



Le projet TCAN TELEOS : Technology enhanced Learning in orthopaedic surgery

Vanda Luengo, Michel Dubois, Lucile Vadcard, J. Tonetti

► To cite this version:

Vanda Luengo, Michel Dubois, Lucile Vadcard, J. Tonetti. Le projet TCAN TELEOS : Technology enhanced Learning in orthopaedic surgery. 2006. hal-00593058

HAL Id: hal-00593058

<https://hal.science/hal-00593058>

Submitted on 13 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TELEOS : Technology enhanced Learning in orthopaedic surgery

Vanda Luengo¹, Michel Dubois², Lucile Vadcard¹, Jérôme Tonetti³

¹ Laboratoire LIG, équipe MeTAH, UJF, CNRS, 385 rue de la Bibliothèque - B.P. 53 - 38041 Grenoble Cedex 9

² Laboratoire LPS, 151 rue des universités - 38400 Saint-Martin d'Hères

³ CHU de Grenoble, Service d'Orthopédie-Traumatologie, Hôpital Albert Michallon BP 217, 38043 Grenoble cedex 9

1. INTRODUCTION

Le projet présenté dans cet article est fortement pluridisciplinaire. Les auteurs appartiennent aux champs de la chirurgie orthopédique, des Sciences de l'éducation, de la Psychologie et de l'informatique. Le projet vise à concevoir des outils informatiques pour la formation chirurgicale basés sur une analyse réelle des situations de travail. L'environnement TELEOS (Technology Enhanced Learning for Orthopadic Surgery) repose ainsi sur une description fine de l'expertise chirurgicale, pour améliorer sa transmission aux novices (internes en formation), hors du bloc opératoire, et acquérir une certaine aisance face aux interventions de vissage percutané du bassin.

Dans cet article nous présentons le contexte général et les champs conceptuels, la méthode employée pour analyser l'expertise chirurgicale ainsi que les modèles et outils informatiques qui constituent l'environnement d'apprentissage.

2. CONTEXTE

2.1. Les lésions de l'anneau pelvien

Le traitement des lésions de l'anneau pelvien par chirurgie percutanée a permis de réduire les inconvénients liés à la chirurgie à foyer ouvert : risques d'infection, hématomes dus à la manipulation de certains muscles au cours de l'intervention. En revanche l'intervention chirurgicale est plus délicate à effectuer puisque le contrôle du geste est réalisé par l'intermédiaire de radios qui sont prises au cours de l'action (absence de contrôle visuel direct). Cette technique nécessite une très bonne connaissance de l'anatomie de la partie concernée, ainsi qu'une capacité de mise en correspondance des clichés radios avec l'anatomie spatiale du corps afin d'envisager la trajectoire de la broche (la pose de la broche est l'étape cruciale de cette technique, puisque c'est elle qui va guider la vis) (Merloz et al. 2006, Tonetti 2003). Les lésions concernées par cette technique sont les fractures du sacrum et les disjonctions de l'articulation sacro-iliaque. Les principes de la technique sont d'une part de neutraliser ou de mettre en compression la lésion, d'autre part d'effectuer un trajet strictement intra osseux pour éviter toute lésion des parties molles présentes dans cette zone. La progression de la broche servira de guide au foret, au taraud puis à la vis est effectuée sous contrôle fluoroscopique. Les incidences de face, profil, inlet et outlet sont utilisées (Routt, 1996).

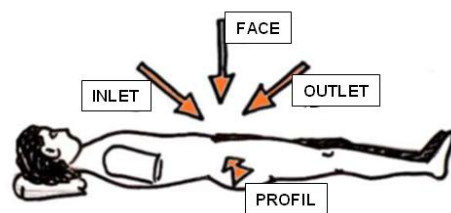


Fig. 1:

Figure 1. Incidences utilisées lors du vissage ilio-sacré.

L'interprétation des clichés radios en termes de contrôle de l'état d'avancement de la broche et l'interprétation diagnostique d'actions à entreprendre pour poursuivre ou reprendre une trajectoire fait appel à des connaissances de différentes natures (déclaratives, procédurales) chez le chirurgien (Vadcard 2003) dont une part importante a été acquise par connaissances empiriques forgées dans l'action. Ces connaissances sont largement implicites, tacites, pas facilement formalisables, même si elles constituent des éléments essentiels de l'activité réelle du chirurgien. L'analyse de ces connaissances constituent le cœur du projet TELEOS, en tant qu'éléments essentiels à prendre en compte pour articuler formations théorique et pratique. Les paragraphes suivants exposent la méthode utilisée pour extraire ces connaissances, les formaliser et les intégrer dans l'environnement de formation TELEOS, dédié à leur apprentissage.

2.2. Modalités traditionnelles d'apprentissage et acquisition d'expertise professionnelle

Des difficultés d'enseignement sont inhérentes à la chirurgie. L'apprentissage pratique se déroule pour une grande part en salle d'opération, sur le mode du compagnonnage. Il requiert la présence d'un chirurgien expert qui supervise et assiste la pratique d'un chirurgien apprenant. L'acquisition d'une pratique efficace nécessite aussi, dans un domaine donné, que l'apprenant soit le plus souvent possible reconfronté aux mêmes classes de situation. Cette répétition fréquente des mises en situation peut en effet permettre au chirurgien apprenant de se familiariser avec les nombreuses variations de paramètres possibles au sein d'une même catégorie d'opération chirurgicale et d'acquérir progressivement l'autonomie nécessaire à la réalisation complète d'une intervention.

Cette constitution de l'expérience exige deux éléments : des actes opératoires répétitifs au sein d'une même catégorie d'intervention et du temps pour se construire dans un double mouvement : un mouvement d'automatisation des conduites (rapidité, fiabilité) et un mouvement de réélaboration de la conduite à un niveau supérieur (prise de conscience, autoréflexion sur sa pratique, métaconnaissances et métacompétences). Or, le parcours d'apprentissage par tutorat d'un chirurgien apprenant dans un domaine donné ne rencontre pas souvent (faute de temps mais aussi de cas à traiter « disponibles » dans une période donnée) les mêmes catégories d'intervention. Il apprend plus des variétés d'interventions (portant sur des objets différents ; on peut parler d'acquisition de largeur de champ dans un domaine donné) que des approfondissements à partir de situations typiques mais aussi variées et variables au sein d'une même catégorie d'intervention. Or, l'efficacité opératoire dans une catégorie d'intervention donnée nécessite des mises en situation multiples permettant des acquisitions de connaissances et de compétences pour faire face à des situations problèmes qui sont par essence variées et variables (âge du patient, usure générale, type d'accidents, caractéristiques spécifiques des lésions, etc.). L'enjeu de ce type d'apprentissage est donc de faire acquérir des habiletés qui permettront de faire face ou du moins de s'adapter à des

situations nouvelles (Pastré, 1997) en intercatégories mais aussi en intracatégorie d'intervention. L'introduction d'outils informatiques dans ce système d'apprentissage peut constituer une piste de solutions à ce problème (Eraut & du Boulay 2000), à condition qu'elle s'accompagne d'une réflexion solide au niveau didactique et pédagogique. Les environnements informatiques doivent se concevoir à partir de l'analyse des compétences (Samurçay & Rogalski, 1998) des chirurgiens experts pour déterminer la nature des habiletés à acquérir (perceptivo motrices, conceptuelles, décisionnelles, stratégiques, etc.).

2.3. Analyse de l'expertise chirurgicale et conception d'un environnement informatique

Dans le domaine de la formation professionnelle, les simulateurs ont donné lieu à une abondante littérature (cf. Bainbridge & Quintanilla, 1989 ; Patrick, 1992). Déjà pour Hinrichs (1976) « un des vieux principe de formation, est le principe selon lequel la pratique d'une tâche exigeant des comportements aussi proches que possible de ceux qui seront utilisés dans la tâche finale améliore le transfert des compétences (...) et constitue un moyen efficace au service de la formation » (p. 853). L'analyse psychologique des problèmes posés par la simulation dans la formation professionnelle a aussi fait l'objet d'une importante littérature (Patrick, 1992 ; Bainbridge et Ruiz Quintanilla, 1989 ; Seymour, 1996 ; etc.). Un consensus marque ces études : le souci d'articuler le plus possible l'analyse de l'activité de la situation de travail de référence avec l'analyse de l'activité de la situation de simulation (Leplat, 2005). On y voit la volonté aussi de passer (pour reprendre des termes piagétien) de la dimension figurative (les propriétés de la situation) à une dimension opérative (l'action que doit faire l'opérateur et notamment le problème qu'il doit résoudre). Cette référence très forte à l'activité opérative permet d'aborder la question de la relation entre situation professionnelle de référence et situation simulée d'un point de vue psychologique et non d'un point de vue simplement technologique. L'analyse des apprentissages devient au centre des interrogations et permet de s'intéresser aux situations de résolution de problèmes présentes dans le travail réel pour d'analyser en quoi et comment leur transposition dans une simulation permet de générer des apprentissages pertinents. La relation (i.e. l'adéquation) entre la tâche simulée et la tâche de référence constitue alors le point central des réflexions pour la conception d'un simulateur. La démarche méthodologique pour réaliser un simulateur d'apprentissage comporte alors trois étapes (Leplat 2005; Pastré 2005 ; etc.) :

- l'analyse du travail pour aider à construire la simulation, préalable à toute conception du simulateur ; elle permet d'identifier les situations problèmes présentes dans l'activité réelle de travail,

- la conception de la situation simulée, travail de transposition qui relève de l'ingénierie didactique professionnelle et qui permet de transformer la situation de travail de référence en situation simulée à usage didactique. On ne cherche pas nécessairement une fidélité technique par rapport à la réalité mais une équivalence pertinente entre le problème identifié dans le travail et le problème mis en scène dans la situation didactique pour faciliter l'apprentissage.

- l'analyse des apprentissages (notamment par des résolutions de problèmes) que cette situation simulée permet de mettre en évidence.

Le simulateur, en tant qu'objet est conçu comme un instrument (Rabardel, 1995) : objet d'une genèse instrumentale, approprié par les apprenants (comme par les formateurs) va servir de support à une activité. Cette activité possède une double face (Samurçay & Rabardel, 2004):

- activité productive : on y exécute une tâche, même si c'est de façon simulée. Il s'agit d'une activité de transformation du réel (matérielle ou symbolique).

- activité constructive : on apprend par l'action lors de l'exécution de la tâche. La situation est fictive, l'activité productive est un simulacre mais l'activité constructive (d'apprentissage) est bien réelle. Dans cette dimension constructive, l'individu produit et acquiert des nouvelles connaissances et compétences (i.e. nouvelles ressources) et se transforme lui-même. Cette création de ressources ne se fait jamais ex nihilo : elle s'appuie sur l'existant, les instruments, les schèmes ou concepts disponibles qui sont modifiés pour les rendre efficaces face aux situations nouvelles rencontrées via la simulation.

Les « situations problèmes » constituent alors le « cœur » de la didactique professionnelle : ce sont elles qui engendrent un processus d'apprentissage. Le rôle du simulateur est de multiplier intentionnellement les « situations problèmes » qui vont déstabiliser chez un sujet l'emploi de ses ressources habituelles, de manière à provoquer chez lui la mise en route d'une genèse opérative source de création de compétences nouvelles. Deux grandes questions se posent alors : Comment passer de la variété et de la variabilité des situations caractéristiques d'un champ professionnel à une certaine unicité et généricité de raisonnement ? Comment transformer un champ professionnel en champ conceptuel ? Pour Vergnaud (1991), il est nécessaire d'extraire la structure conceptuelle sous-jacente à des classes spécifiques de « situations problèmes » d'une situation professionnelle pour inférer à partir de cette structure des catégories de situations susceptibles de générer chacune un répertoire commun de raisonnement conceptuel et de règles d'action.

Du point de vue des EIAH, dans une problématique d'apprentissage, le système doit permettre d'aider le « chirurgien apprenant » (voire le « chirurgien expert » en situation de « training ») à construire des connaissances et des compétences à partir des manières d'agir et de raisonner mises en œuvre dans des situations opératoires réelles pour mieux s'adapter à la variabilité des cas et des situations au sein d'une intervention donnée. Cette perspective nécessite, selon nous, de procéder à l'analyse de l'expertise lors de l'activité chirurgicale en essayant de déterminer le plus possible les règles de prélèvement des informations (stratégies de visualisation et d'observation), les informations utilisées (éléments pertinents d'une situation pour choisir une action à faire), les connaissances (communes à tout les praticiens - théorie générale- ou particulière via les expériences antérieures ou les niveaux d'expertise), les règles de traitement des informations (interprétations issues de l'analyse et de la synthèse des informations), les règles de décision (choix d'actions, parfois contradictoires entre-elles) etc. Suite à cette phase de recueil de l'expertise (mais aussi des difficultés de construction de l'expertise pour les chirurgiens apprenants) la conception de ce type d'EIAH, via le partenariat de recherche, inclut une analyse didactique et informatique avec ses modèles et méthodes, afin de pouvoir prendre en compte les contraintes liées à la représentation de connaissances dans ce contexte particulier.

Ainsi, du point de vue informatique notre recherche est centré sur la relation entre la représentation des connaissances du domaine et la mise en œuvre de mécanismes d'exploitation de ces connaissances. En particulier, elle attire à la définition et la réalisation de la récupération de traces lors de l'activité de l'apprenant sur les objets informatiques d'apprentissage. Ces traces doivent permettre le diagnostic (Minh Chieu et al. 2006) des connaissances engagées par l'apprenant lors de son activité, et la génération des rétroactions (Mufti Alchawafa et al. 2007) relatives aux connaissances manipulées.

3. METHODE

3.1. Analyse psycho-ergonomique de l'activité chirurgicale

L'objectif principal de cette phase a consisté à analyser l'activité opératoire chirurgicale, lors de vissages sacro-iliaque percutanés, afin de recueillir les connaissances et compétences nécessaires à mettre en œuvre pour réaliser ce type d'intervention, en vue de la conception de l'environnement de formation (Pastre 2002). Nous avons plus spécifiquement étudié le traitement de l'information effectué par le chirurgien lors de phases d'actions représentatives de l'activité opératoire globale.

Acquisition des données. Nous avons réalisé des vidéos de réalisations de vissages sacro-iliaques au CHU de Grenoble. L'étude de ces vidéos nous a permis de formaliser le déroulement d'une intervention réelle, de lister les différentes tâches à effectuer et de noter les différents contrôles de l'action. Pour ne pas perturber la situation de travail, la méthode de recueil de données utilisée est celle de l'observation assistée (Leplat 2000). Plusieurs modalités de recueil de données ont été mobilisées (analyse documentaire, observations avec vidéo, enregistrement sur des disquettes informatiques des radiographies prises lors de l'intervention, etc.). Les recueils précédents ont permis de formaliser les différentes phases et le détail des phases permettant la réalisation de l'activité chirurgicale. L'ensemble des dialogues entre le chirurgien expert et le chirurgien débutant ainsi que les gestes exécutés ont été retranscrits. A l'aide de ces différents éléments, nous avons pu sélectionner trois séquences chirurgicales qui ont fait l'objet d'une étude approfondie. Ces trois séquences (d'environ 3 mn chacune) sont récurrentes lors de l'acte opératoire et sont représentatives de la complexité de l'opération chirurgicale du vissage sacro-iliaque. Elles mobilisent des compétences importantes en terme de représentation spatiale, de contrôle de l'action et de qualité de raisonnement. Ces séquences sur vidéo ont permis par verbalisation simultanée, hors situation réelle, de faire approfondir les raisonnements des experts et des apprenants.

Les travaux réalisés ont permis de recueillir un certain nombre d'informations et de raisonnements réels implicites concernant la technique du vissage sacro-iliaque percutané en situation réelle. Les comparaisons entre raisonnements des experts et des apprenants suite à la visualisation de situations problématiques réelles ont permis de formaliser de grandes classes de situations problèmes et d'esquisser certaines perspectives de conception du simulateur pour favoriser l'apprentissage. Nous avons pu également remarquer, pour chaque étape, l'importance des contrôles de l'action via les radiographies et l'importance des stratégies de diagnostic de situation à partir de ces radiographies (qui doivent être le plus limitées en nombre pour des problèmes d'irradiation du patient et de l'équipe médicale). Ces contrôles radiographiques demandent une bonne capacité d'analyse de la part du chirurgien qui effectue son repérage à partir de la position anatomique de référence mais aussi à partir d'indices prélevés, exigeant une rotation mentale pour passer d'une perception visuelle en 2D à un raisonnement mental du geste opératif en 3D. L'analyse de l'activité réelle a permis de mettre en évidence plusieurs types de positionnements erronés (broche mal impactée, mal orientée, particularité de chaque incidence, etc.). Pour que l'interne-apprenant intègre les schèmes du passage 2D-3D (point le plus délicat dans l'analyse diagnostique de situation et la réalisation du geste), il apparaît important que le simulateur conserve et permette de visualiser l'enchaînement réel des actions, selon les incidences utilisées, en adaptant les feed-back en fonction des difficultés rencontrées.

Correction d'une broche guide mal impactée sur l'incidence inlet

- Si la trajectoire de la broche est correcte, mais que le point d'entrée est trop postérieur (orange), on va prendre une autre broche pour corriger le décalage. Celle-ci va être insérée, parallèlement à la broche de référence, et plus antérieurement, le long du plan représenté par la flèche verte
- Inversement, si le point d'entrée est trop antérieur (rouge), la deuxième broche va être insérée, parallèlement à la broche de référence, et plus postérieurement, le long du plan représenté par la flèche verte

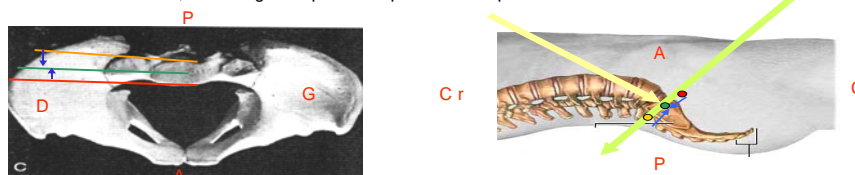


Figure 2. Exemple de proposition d'une représentation visuelle sur le simulateur pour la correction de trajectoire d'une broche guide mal impactée (cas d'une incidence inlet)

Le recours à des outils de formation comme le simulateur permettrait ainsi d'expliquer par exemple le positionnement de la broche guide sur chaque incidence, d'appliquer les gestes correctifs pour que les apprenants-internes se familiarisent et acquièrent plus facilement les représentations de rotation mentale du passage 2D-3D. Ces premières informations sont en cours de validation (en fonction de la fréquence des cas cliniques disponibles et de la disponibilité des praticiens) par des observations sur d'autres cas nécessitant un vissage sacro-iliaque percutané, à la fois auprès d'autres experts chirurgiens et de chirurgiens débutants.

Visionnage des données. Les recueils précédents ont permis de formaliser les différentes phases et le détail des phases permettant la réalisation de l'activité chirurgicale. Nous avons aussi retranscrit l'ensemble des dialogues entre le chirurgien expert et le chirurgien débutant ainsi que les gestes exécutés. A l'aide de ces différents éléments, nous avons pu construire un arbre des tâches, représentant à la fois les procédures prescrites issues de l'analyse documentaire et les activités réelles extraites de la vidéo de l'opération ainsi que les dialogues. Les radiographies ont pu également être insérées dans l'analyse.

Choix des séquences d'analyse. Trois séquences chirurgicales ont été sélectionnées pour faire l'objet d'une étude approfondie : repérer le point d'entrée cutané, insérer une broche guide et pousser la broche guide. Ces trois séquences sont représentatives de la complexité de l'opération chirurgicale du vissage sacro-iliaque.

- Séquence n° 1 : Repérer le point d'entrée cutané : Cette séquence a été sélectionnée car elle regroupe deux tâches principales dont les conséquences sont importantes pour la suite de l'intervention. La première tâche concerne le repérage osseux, permettant d'avoir un point d'intersection symbolisant la projection latérale du corps de S1. La deuxième tâche consiste à repérer le point d'entrée cutané, proprement dit, en se situant par rapport au repère tracé. Chaque tâche exige des contrôles radiographiques spécifiques, de manière à positionner correctement la barre métallique pour tracer le repère, et ensuite la broche guide, pour visualiser le point d'entrée cutané. Il est à noter que le nombre de radiographie doit être le plus limité possible pour éviter une irradiation importante à la fois du patient et de l'équipe d'intervention.

- Séquence n°2 : Insérer une broche guide : Cette séquence est essentielle car elle permet, par prolongement mental, de définir une trajectoire de vis au contact de l'os iliaque. Cette séquence demande également de nombreux contrôles radiographiques de l'action selon plusieurs incidences. Chaque cliché pris est analysé pour prendre la décision de valider ou de

ne pas valider la trajectoire, et pour décider des corrections à apporter à une trajectoire mal engagée.

- Séquence n° 3 : Pousser la broche guide : Cette séquence représente la progression de la broche guide, par rapport à l'os iliaque, à l'articulation sacro-iliaque et au sacrum. Durant cette étape, les risques sont les plus nombreux (lésions du tronc lombo-sacré, du trou sacré antérieur). Les incidences de contrôle sont également très utilisées pour visualiser le trajet de la broche guide. Ces clichés radiographiques exigent une analyse fine pour les prises de décisions futures. Après cette phase, c'est-à-dire lorsque le chirurgien valide la position finale de la broche, le vissage sacro-iliaque, proprement dit, peut alors débiter, à savoir le forage, le taraudage et le vissage. Ces séquences n'ont pas été sélectionnées car elles s'effectuent le long de la broche guide préalablement positionnée. Les difficultés de positionnement ne sont plus en jeu.

Les trois séquences retenues mobilisent des compétences importantes en terme de représentation spatiale, de contrôle de l'action, et de qualité de raisonnement pour apporter des mesures correctrices au positionnement de la broche guide.

Entretiens de verbalisation consécutive. A partir de l'identification des séquences pertinentes pour l'analyse, nous avons identifié des périodes de film (n = 3 ; temps 4 minutes par séquence) pour les présenter aux chirurgiens afin de faire approfondir verbalement les données recueillies et permettre d'accéder aux raisonnements des chirurgiens. Les chirurgiens apprenants (n = 2) et chirurgiens experts (n = 3) ont été interrogés sans contrainte de temps. Des relances systématiques (pourquoi, comment) ont permis de faire expliciter le plus possible les raisonnements mis en œuvre. Les questions se rapportant à la représentation spatiale ont rapidement conduit les chirurgiens à expliquer leur raisonnement à partir d'une pièce osseuse réelle et de supports variés (radios, photos et schémas).

Principaux résultats. Les travaux réalisés ont permis de recueillir un certain nombre d'informations concernant la technique du vissage sacro-iliaque percutané en situation réelle. Les chirurgiens de notre échantillon utilisent deux méthodes différentes pour les étapes du repérage du point d'entrée cutané et pour l'insertion de la broche guide. Nous avons pu également remarquer, pour chaque étape, l'importance des contrôles de l'action. En effet, chaque sous-tâche est systématiquement contrôlée à l'aide d'un cliché radio, pour vérifier le caractère intra osseux de la trajectoire. Ces contrôles radiographiques demandent une bonne capacité d'analyse de la part du chirurgien qui effectue son repérage à partir de différents indices, comme la ligne condensée sur l'incidence de profil par exemple. Après l'analyse de la représentation 2D, le chirurgien valide ou non le cliché. Si ce dernier ne permet pas de poursuivre l'intervention, il doit effectuer un geste correctif, passant du 2D au 3D, afin de corriger le décalage observé sur le patient. Ce passage va entraîner la mise en œuvre de règles de type « si (condition) alors (action) ».

Par exemple « si la broche est trop basse sur l'inlet alors elle est trop ventrale sur le patient ». Ce type de règle s'accompagne d'une représentation mentale de l'articulation entre différents registres de représentation (radio, os, patient).

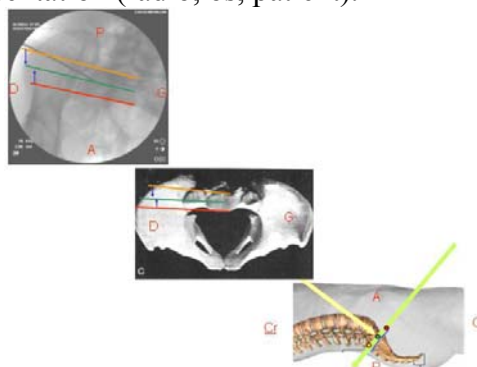


Figure 3, : Trois registres de représentation sont articulés

3.2. La formalisation pour un modèle de connaissances computable

Les résultats de l'analyse didactique et psycho-ergonomique sont traités en utilisant un modèle qui soit computable, afin de permettre la représentation informatique ultérieure. Ce modèle est basé sur une représentation formelle de la résolution de problèmes (Balacheff 1995) qui fait intervenir les éléments de quatre ensembles : celui des problèmes (P), celui des actions entreprises (R), celui des contrôles mis en œuvre (Σ) et celui des registres de représentation (L).

Dans le modèle utilisé, la résolution de problème peut ainsi se modéliser par une succession d'étapes impliquant des éléments de ces quatre ensembles : $\sigma(r(p(l))) = \text{vrai}$ ou faux. Ainsi, tous les éléments de connaissances extraits de l'activité opératoire de l'expert et de l'interne (une centaine actuellement) sont explicités sous cette forme. Nous établissons pour l'ensemble des contrôles repérés une distinction entre des contrôles qui relèvent du domaine déclaratif de l'activité (connaissances explicites, formalisées) et ceux qui relèvent du domaine empirique de l'activité (connaissances construites dans l'action, établies par l'expérience, non explicitées mais mises à jour par les analyses de l'activité). Nous produisons également dans cette étape de formalisation une mise en correspondance des ensembles P, R et Σ : pour chaque problème (P), nous décrivons l'ensemble des contrôles (Σ) pouvant intervenir dans sa résolution, en fonction des actions effectuées (R). Ci-après un aperçu de cette mise en correspondance :

	A	B	C	D	E	F	G	H	
4	R	1er point entrée	choisir point entrée	choisir orientatic	choisir orientatic	enfonceur	prendre profil	prendre inlet	Prendre inlet
5	E1	X	X						
6	E1bis	H	H						
7	E2			X	X				
8	E2bis			H	H				
9	E12	X	X	X	X				
10	E13	X	X	X	X				
11	E20	H	H						
12	E21	X	X						
13	E22	X	X	X	X	X	X	X	
14	E2bis	X	X	X	X	X	X	X	
15	E2ter				X (e35)	X (e20,e21,e22)	X (e35)	X (e35)	
16	E7								
17	E8						X (e1,e2,e3)		
18	E9						X (e8,e9,e10)		
19	E10							X (e14,e15,e16)	
20	E11							X (e17,e18,e19)	
21	E55					X (e23,e24,e25)			
22	E70					H			
23	E71					X			
24	E65						H		
25	E68						X		
26	E8bis						X (e2,e5)		
27	E20bis						X (e20,e5)		
28	E14						X (e1)		
29	E14ter						X (e2)		
30	E14ter						X (e4)		
31	E14ter						X (e10)		
32	E14ter						X (e13)		
33	E14ter						X (e7)		
34	E14ter						X (e6)		
35	E8ter							X (e14)	
36	E8quater							X (e19)	
37	E20							X (e14)	
38	E20bis							X (e19)	
39	E20ter							X (e16)	
40	E20quater							X (e18)	
41	E38					X (e21)(e47)			

Σ14 : si la broche touche corticale antérieure de l'aileron sur l'inlet, alors elle est trop ventrale (antérieure) sur le patient

distance_broche_et_corticale_antérieure_aileron_sur_inlet < 4mm

Domaine de validité des contrôles (états de P)

Figure 4, Réseau de connaissances

4. L'environnement informatique d'apprentissage

4.1. Représentation informatique du réseau de connaissances.

L'ensemble organisé des connaissances du domaine est formalisé à l'aide de l'ensemble des problèmes, contrôles et opérateurs décrit antérieurement. Nous avons défini les relations de dépendance et de causalité entre ces ensembles afin de les représenter sous forme d'un réseau bayésien (Conatti et al. 2002). L'avantage essentiel des réseaux bayésiens est de permettre une formalisation d'un domaine de connaissance sous forme de graphe causal. Ce réseau permet également d'intégrer une notion d'incertitude dans le système, à partir d'une approche quantitative.

Nous identifions dans la les relations de dépendances entre les problèmes (Pa, Pb), les variables didactiques (VD) et les opérateurs (R). Enfin, il y a une dépendance entre les opérateurs (R) et les contrôles (Σ) ; un problème P est résolu si les opérateurs associés R sont appliqués.

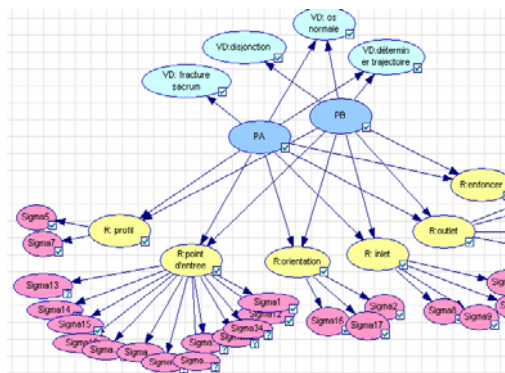


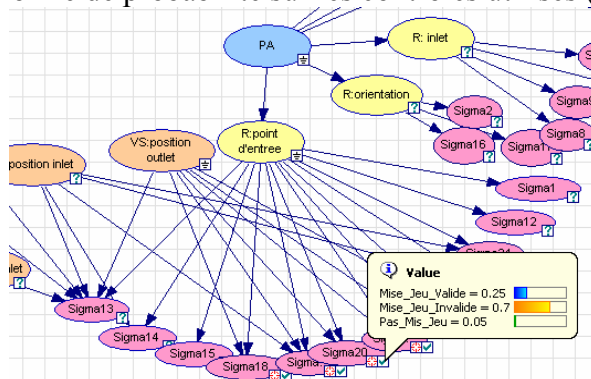
Figure 5 Extrait du réseau bayésien sur les conceptions

Calcul du Diagnostic. Le diagnostic est fait en deux étapes. Une première étape calcule les variables des situations. Une deuxième étape fait les inférences sur le réseau bayésien. Quant à la première étape, nos variables des situations portent de l'information factuel (sans jugement vis à vis de l'état de connaissances) sur des objets manipulés lors de la résolution du problème. Ainsi la position de la vis dans une radio inlet peut être une variable de situation. Pour produire ce type de diagnostic, nous avons un ensemble de « règles expertes » que nous appliquons aux traces laissées par le simulateur. Voici des exemples de variables de situation :

Règles pour le diagnostic	
SI	ALORS
((position_broche_sur_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessous_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_bas_inlet
((position_broche_sur_canal_sacre_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessus_canal_sacre_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_haut_inlet
((position_broche_plus_bas_sur_inlet=="ou") ET ((position_broche_sur_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessous_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_bas_inlet_plus_bas
((position_broche_plus_haut_sur_inlet=="ou") ET ((position_broche_sur_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessous_corticale_anterieure_aleron_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_bas_inlet_plus_haut
((position_broche_plus_bas_sur_inlet=="ou") ET ((position_broche_sur_canal_sacre_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessus_canal_sacre_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_haut_inlet_plus_bas
((position_broche_plus_haut_sur_inlet=="ou") ET ((position_broche_sur_canal_sacre_sur_inlet=="ou") OU (position_broche_dessus_canal_sacre_sur_inlet=="ou"))	position_inlet = position_trop_haut_inlet_plus_haut

Figure 6 exemple de règles de diagnostic pour calculer les variables de situation

La deuxième étape permet de diagnostiquer la connaissance mobilisée lors de la résolution de problème avec un certain degré d'incertitude. Actuellement le diagnostic permet de déduire l'état des contrôles utilisés lors de la résolution du problème. Ainsi un contrôle sera mis en jeu valide, mis en jeu invalide ou pas mis en jeu, en fonction, d'une part, du contexte du problème (les opérateurs qui interviennent lors de la résolution) et, d'autre part, des variables de situation qui sont calculées dans l'étape 1 du diagnostic. Le résultat de ce diagnostic est rendu sous forme de probabilité sur les contrôles utilisés (Figure 7).

Figure 7. *calcul du diagnostic*

Par rapport au réseau de connaissances initialement présenté, nous ajoutons donc un type de noeud, celui des VS (variables de situation) qui nous permet de récupérer le contexte dans lequel se trouve l'utilisateur.

Un autre aspect que nous avons travaillé est la prise en compte de la dimension temporelle du diagnostic, autrement dit la prise en compte de l'historique des actions. Ainsi, dans le cas d'un scénario au cours duquel l'utilisateur fait une première trajectoire incorrecte puis corrige sa trajectoire dans le mauvais sens, le diagnostic sur les contrôles n'est pas le même que si ce même utilisateur avait corrigé sa trajectoire dans le bon sens, même si dans les deux cas la deuxième trajectoire obtenue n'est toujours pas correcte (*Figure 8*).

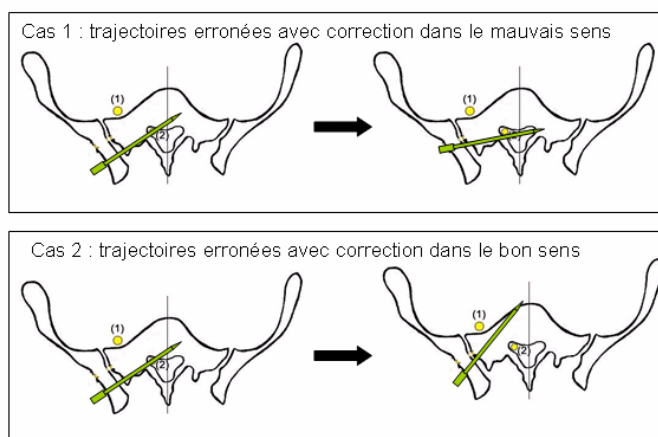


Figure 8. Prise en compte de la dimension temporelle pour le diagnostic, aspect didactique

Pour prendre en compte cette dimension temporelle, nous gardons les valeurs des variables de situation aux temps T_n et T_{n+1} , et nous avons rajouté une dépendance temporelle entre les contrôles. Ainsi le diagnostic des contrôles à T_n dépend des variables de situation et des opérateurs, mais aussi du contrôle lui-même dans T_{n-1} .

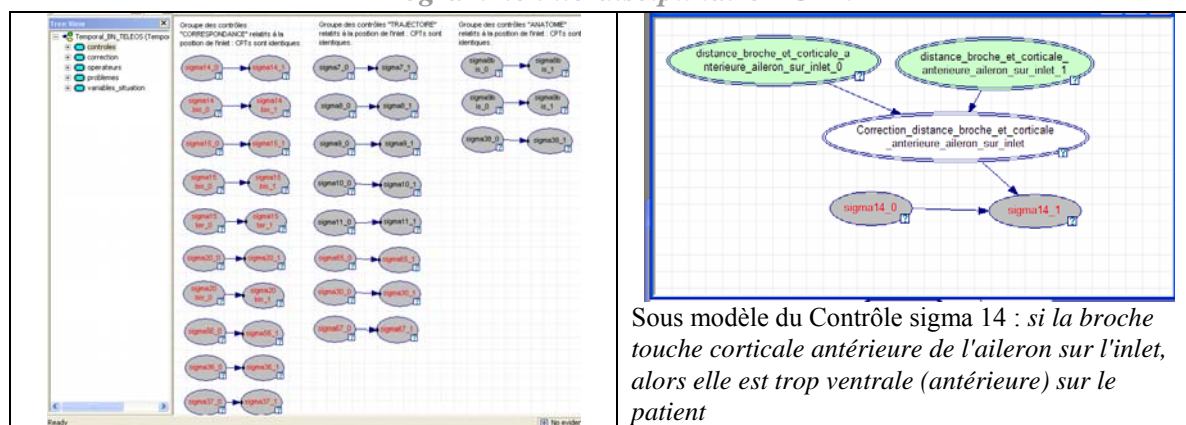


Figure 9 prise en compte de la dimension temporelle dans le diagnostic, aspect informatique.

Les contrôles diagnostiqués seront pris en compte pour la prise de décisions que nous verrons plus en détail dans la suite.

4.2. Calcul de la décision didactique.

Du point de vue informatique, et pour la conception du modèle informatique de prise de décisions didactiques, nous situons notre problématique de recherche essentiellement dans les domaines de la représentation de la connaissance et de l'analyse de décision.

Dans une première étape nous identifions deux décisions:

- A partir du diagnostic des connaissances, prendre la décision concernant la cible de la rétroaction (choisir l'élément de la connaissance en jeu qui sera l'objet de la rétroaction),
- A partir du choix de la cible, prendre la décision concernant la forme de la rétroaction (choisir la forme la mieux adaptée pour traiter l'élément de connaissance ciblé).

Ces deux décisions seront les entrées d'une deuxième étape de décision. La deuxième étape formule la rétroaction en choisissant son contenu à partir de ces deux entrées.

Ainsi, par exemple, si le système a choisi de produire une rétroaction sur un contrôle déclaratif, il faut décider quelle partie du cours est la plus pertinente vis-à-vis de cette connaissance ; ou si le système a décidé de produire une rétroaction sur un contrôle empirique il faut décider quel est le meilleur problème à donner à l'utilisateur pour remédier à la difficulté identifiée.

Pour faire un modèle calculable de la prise de décision nous avons donc décidé d'utiliser les diagrammes d'influence dans les réseaux bayésiens . Nous avons ainsi ajouté encore deux nœuds qui sont les nœuds d'utilité et de décision. Nous obtenons un graphe avec une structure particulière (diagramme d'influence) comme celui présenté ici (Figure 10). L'algorithme d'initialisations des utilités, ainsi que l'algorithme général sont développés dans le cadre de la thèse Mufti Alchawafa et décrit dans Mufti Alchawafa et al. 2007.

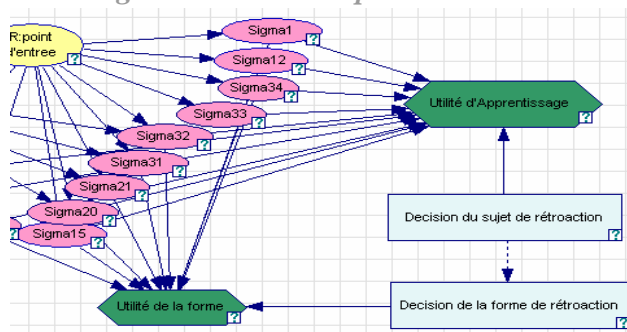


Figure 10, la représentation de la prise de décision

4.3. Architecture de l'environnement de formation TELEOS.

La représentation informatique permet d'intégrer le réseau de connaissances au sein d'une architecture logicielle dédiée à la formation :

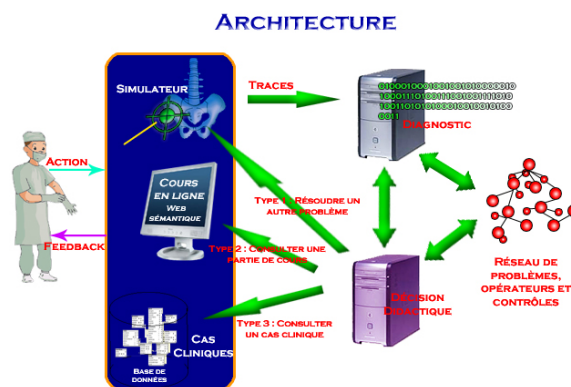


Figure 11 Architecture de l'environnement de formation TELEOS

Un scénario classique d'utilisation du système est le suivant :

- L'utilisateur travaille sur l'agent simulateur.
- Quand l'utilisateur valide sa trajectoire dans le simulateur, l'agent simulateur communique les traces à l'agent diagnostique.
- L'agent diagnostique propose à l'agent prise de décisions didactiques un ensemble de contrôles diagnostiqués. C'est-à-dire un ensemble de contrôles associés à une probabilité distribuée sur trois variables : mis en jeu valide, mis en jeu invalide ou pas mis en jeu (la somme des probabilités de ces trois états étant égale à 1 pour chaque contrôle).
- L'agent prise de décisions didactiques communique à l'agent compagnon les suites possibles (résoudre un autre problème, consulter le cours en ligne ou consulter un cas clinique).

L'agent compagnon propose à l'utilisateur les suites possibles d'actions et selon le choix de l'utilisateur, cet agent envoie un message à l'agent WEB sémantique, l'agent cas clinique ou l'agent simulateur avec les informations du nouveau problème à résoudre ou de la partie du cours qu'il faut montrer à l'apprenant.

Les agents qui calculent le diagnostic des connaissances de l'utilisateur en fonction de ses actions sur le simulateur, et celui qui calcule une décision quant au retour à lui fournir sont détaillés dans (Luengo et al. 2006).

4.4. Les composants de l'environnement.

Nous avons fait l'hypothèse que les connaissances déclaratives, de par leur forme, seront traitées dans des outils de présentation de l'information de type web sémantique, alors que les connaissances empiriques seront abordées dans des environnements d'aide à la résolution de problèmes comme le simulateur et la base de cas cliniques). Nous présentons brièvement ces outils.

Le cours en ligne indexé et l'ontologie associée (Web sémantique)

La connaissance déclarative est représentée sous deux formes. La première forme est un cours en ligne qui a été construit à partir de données fournies par les experts/enseignants du domaine et de documentations académiques. La deuxième forme est une ontologie qui est en partie une réutilisation d'une ontologie venant de l'université de Stanford (<http://www.smi.stanford.edu/>) et une autre partie qui a été construite dans notre équipe et validé par les experts.

Nous pouvons voir un exemple d'exécution du composant déclaratif dans la figure suivante :

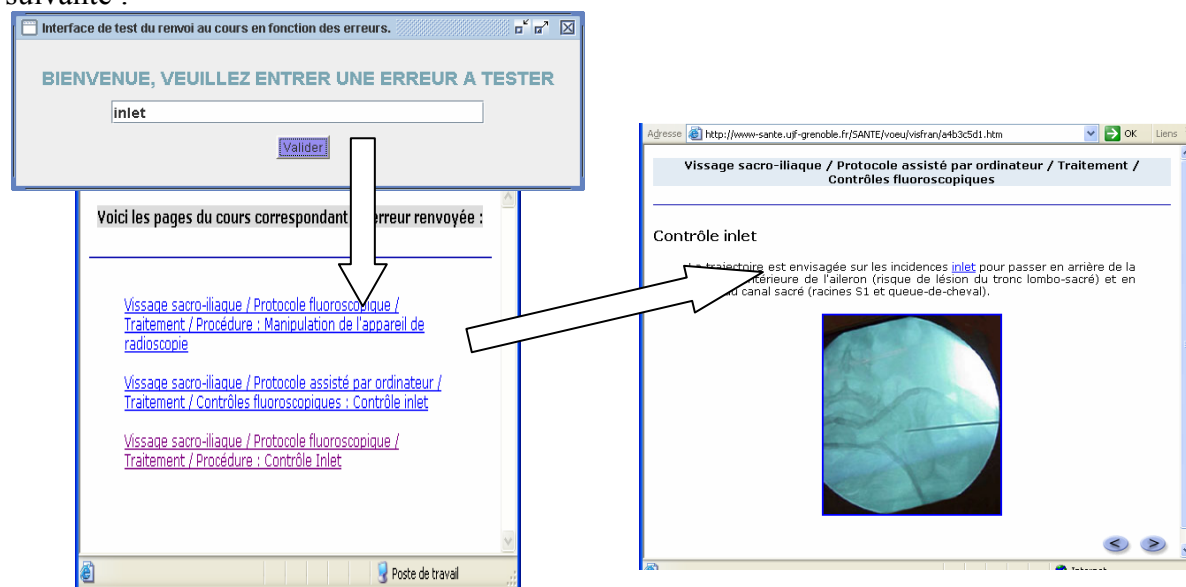


Figure 12. Exemple de rétroaction déclarative

Pour illustrer la façon de fonctionner de cet outil, nous présentons une première fenêtre de test où nous rentrons un mot-clé correspondant à une erreur diagnostiquée. Dans la deuxième fenêtre, un ensemble de liens pertinents par rapport à l'erreur entrée est calculé à partir des ontologies et d'un moteur de recherche développé dans l'équipe. Enfin, l'utilisateur pourra choisir parmi l'ensemble des liens celui qui lui semble le plus approprié (troisième fenêtre). Plus de détails sur cette partie de l'environnement sont donnés dans Luengo et al. 2005 (disponible sur <http://telearn.org>).

Le simulateur 3D

Ce simulateur est une nouvelle version du simulateur développé dans un précédent projet¹ par le laboratoire TIMC (voir <http://www-sante.ujf-grenoble.fr/SANTE/voeu/visfran/>).

Le principe de ce simulateur est de permettre les actions de l'utilisateur sur un volume 3D du bassin (placer, orienter et enfoncer une broche), et de visualiser les radios correspondantes (les quatre incidences inlet, outlet, face et profil sont disponibles, conformément à la pratique

¹ Projet VOEU (IST-1999-13079), <http://vou-caos.vitamib.com/>

opératoire de ce geste). La position de la broche est calculée à chaque action et superposée aux incidences demandées par l'utilisateur sous la forme d'un trait noir. Cette nouvelle version du simulateur laisse des traces des actions de l'utilisateur sous un format structuré qui nous permet d'effectuer les calculs nécessaires au diagnostic de ses connaissances. De plus un outil auteur nous permet de faire varier les situations proposées dans le simulateur selon la nature de l'os (très dense, normal, peu dense) et le type de lésion (fracture du sacrum ou disjonction pure). Les nouveaux cas sont ajoutés en utilisant un volume 3D du bassin construit à partir des scanners et des radios du patient.

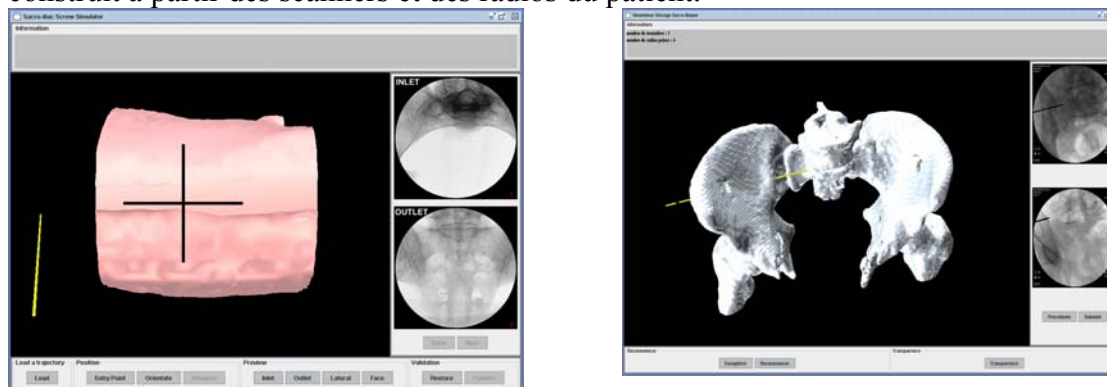


Figure 13. *Le simulateur*

La Base de Données des cas cliniques

Un cas clinique est un dossier patient complet, comprenant les informations depuis le diagnostic de la lésion jusqu'aux contrôles post-opératoires. Du point de vue de l'apprentissage, il peut être présenté sous forme d'un exemple pour renforcer un élément de connaissance ou sous forme d'un contre-exemple pour réfuter un élément de connaissance incohérent par rapport au contexte.

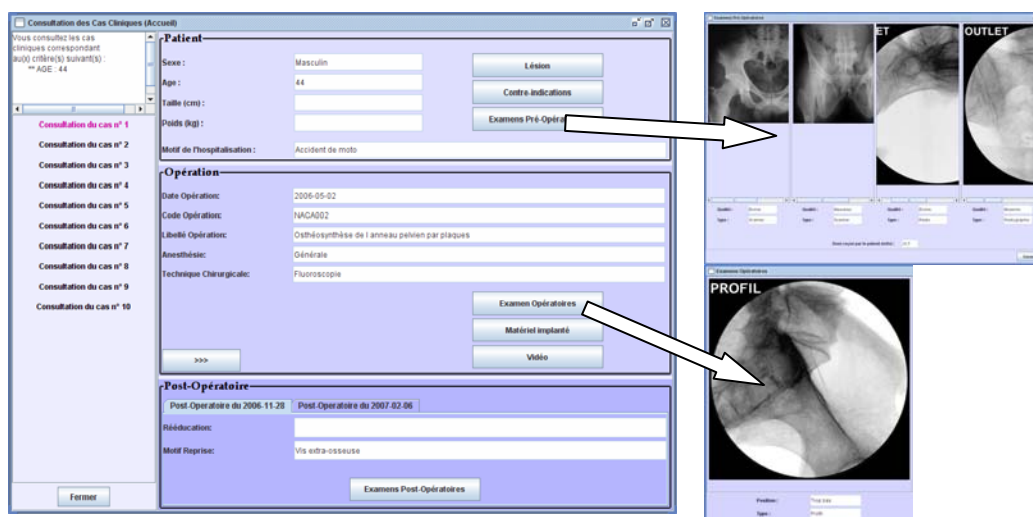


Figure 14. *La base de cas cliniques*

4.5. Validations Informatiques

Du point de vue informatique, la validation est faite selon plusieurs dimensions : validation de l'adéquation en ce qui concerne la représentation informatique (les réseaux

bayésiens) du modèle ckç ; validation de la complétude de chaque outil du domaine (simulateur, web sémantique et base de données des cas cliniques) ; validation de l'interopérabilité et de la flexibilité de la plateforme et de ses différents agents.

Pour faire une première validation sur l'adéquation de la représentation, nous avons donc testé deux systèmes de diagnostic cette année (Minh Chieu et al 2006, Liabeuf 2006). Un premier diagnostic sous forme des règles logiques, avec une méthode appelée KOOD (Knowledge Oriented Operative Diagram, Ploix et al. 2004) et un deuxième à partir du réseau bayésien. Cela a permis de comparer les deux systèmes sur différents critères comme la gestion de l'incertitude, la prise en compte de l'historique, la validité des calculs en fonction de sa complétude. Les résultats actuels montrent que le niveau de description nécessaire n'est pas le même dans les deux cas. En effet, une méthode utilisant des réseaux bayésiens a besoin de moins d'informations a priori que des méthodes analytiques comme KOOD. Alors que les réseaux bayésiens peuvent combler le manque d'informations par leur capacité d'inférence et d'apprentissage incrémental, KOOD nécessite le plus tôt possible le maximum d'information. En contrepartie de ces inconvénients, une méthode comme KOOD, exploitant des modèles du comportement d'apprenants sous forme de règles, peut développer des raisonnements diagnostiques logiques conduisant à des preuves, c'est-à-dire que les résultats obtenus sont démontrés (un expert doué arriverait nécessairement au même résultat). A l'inverse, avec un réseau bayésien les relations sont nécessairement représentées de manière probabiliste. Comme la connaissance représentée dans notre cas est une connaissance empirique et non monotone, nous concluons que le diagnostic avec les réseaux bayésiens est plus pertinent.

Par ailleurs, nous avons procédé à une première évaluation informatique du système de diagnostic. Pour cela, nous avons exécuté sept scénarios conçus à partir de l'analyse didactique. Les scénarios sont tracés dans leur ensemble. Nous obtenons ainsi dans un fichier, au format XML, les différentes actions de l'utilisateur, les traces produites par le simulateur, le premier niveau de diagnostic avec le résultat des règles appliquées (les valeurs des variables de situation) et enfin le diagnostic sur les contrôles. Nous n'avons pas détecté de problèmes informatiques lors du déroulement du scénario. La pertinence de ce diagnostic du point de vue didactique sera validée dans un deuxième temps, le protocole de cette validation est décrit plus loin dans le document.

Quant au calcul pour la décision didactique, nous travaillons actuellement sur la validation des algorithmes de calcul de l'utilité. Pour cette validation une interface de test a été conçue pour pouvoir entrer des diagnostics. Cela nous permet de tester la prise de décision didactique indépendamment du diagnostic et de poser des hypothèses sur ces diagnostics.

Par ailleurs, nous voulons souligner que, dans la conception du système de prise de décisions didactiques (Mufti Alchawafa et al. 2004), il est possible de paramétrer les hypothèses didactiques. Cet aspect rend, d'une part, notre système plus générique et permet de mener la validation du point de vue informatique sans avoir besoin de justifier les hypothèses didactiques. Et d'autre part, il donne plus de flexibilité aux experts (didacticiens) pour paramétrer ou modifier les hypothèses dans le modèle.

En ce qui concerne la dimension de complétude, l'outil « Web sémantique » a été validé par les experts du domaine et actualisé en conséquence.

Quant à la plateforme, l'interopérabilité a été validée par le rajout très facile des nouveaux agents et la modification de certains d'entre eux. Ainsi, la nouvelle version du simulateur a été développée de façon indépendante de la plateforme, et elle a été intégrée avec très peu d'effort (1 journée). De même, concernant la flexibilité, nous avons fait évoluer l'agent Web sémantique, d'un part par sa description classique en tant que cours HTML, et par sa description sémantique avec l'évolution de l'ontologie proposée, et ces évolutions ont été réalisées de façons complètement transparente vis-à-vis de la plateforme.

5. DISCUSSION

Le présent article présente une méthodologie opératoire de conception d'environnement de formation basé sur une analyse de l'activité experte en situation réelle. La valeur ajoutée des composants informatiques ainsi obtenus est relative à leur pertinence par rapport au processus d'apprentissage : basées sur le calcul d'un diagnostic de l'état de connaissances de l'utilisateur du simulateur, la rétroaction qui est fournie à l'utilisateur est adaptée à son propre raisonnement. Le cours en ligne, la base de cas cliniques et le simulateur interviennent donc de manière à accompagner l'utilisateur dans sa formation.

Nous les distinguerons à plusieurs niveaux. D'un point de vue de psychologie ergonomique, cette recherche permet de mieux connaître et d'identifier les points structurants de l'expertise professionnelle dans l'activité chirurgicale de vissage sacro-illiaque. Elle permet aussi de mieux comprendre comment s'acquièrent certains schèmes sensori-moteurs et de définir et d'expérimenter ultérieurement certaines de leurs conditions d'apprentissages. L'analyse de ces schèmes apparaît essentielle à la compréhension des habiletés visuelles et sensori-motrices mises en jeu. En effet, la connaissance de cette expertise aide à concevoir les contenus des situations didactiques du simulateur et la manière dont elles peuvent être agencées. Cela nécessite de considérer prioritairement les variables qui ont un impact sur la construction des compétences. La nature des transpositions (réduction ; amplification ; modifications apportées) peuvent être exploitées avec profit en situation de simulation pour mieux assurer la compréhension de certains phénomènes accentués par rapport à la réalité du fait même de la schématisation présentée par le modèle. La compétence ne se construit pas non plus seulement par l'exercice mais également par la capacité qu'a l'apprenant ou l'expert de revenir sur ce qui a été fait, pour analyser et reconstruire le savoir-faire à un autre niveau. Cette prise de conscience rendue possible par le simulateur et la traçabilité des actions qu'il permet d'enregistrer, peut servir de base à un véritable travail de conceptualisation (au sens de Pastré, 2005) permettant un étayage mutuel entre coordination agie et coordination conceptuelle.

D'un point de vue professionnel, ce projet intéresse les partenaires praticiens hospitaliers car il est lié à la problématique de l'enseignement de leur discipline. L'outil que nous contribuons à élaborer offre un terrain d'application des connaissances sans problème de risque d'erreur, ni de déontologie. Il peut ainsi constituer une étape intermédiaire entre les enseignements formels et les situations de tutorat-compagnonnage, et permettre une pragmatisation des concepts théoriques et prescriptifs de l'action avant leur mise en situation. En outre, les chirurgiens sont à la fois experts et enseignants. Ces deux aspects de leur métier peuvent bénéficier de la mise en place d'une méthodologie d'analyse de leurs pratiques du point de vue de l'action et de sa validation. Mieux comprendre leur geste pour mieux le transmettre, et, mieux analyser le déroulement d'une opération en vue d'une évaluation constructive confrontant les expertises de différents pairs représentent une démarche féconde et novatrice.

Enfin l'application de ce travail concerne aussi la conception informatique. Une maquette de cet environnement, qui prend en compte les résultats de l'analyse des expertises est proposé et validé du point de vue informatique mais il reste à valider du point de vue didactique.

Du point de vue de la recherche en informatique nous séparons le diagnostic de la prise de décision pour pouvoir les étudier et les valider séparément. La condition pour qu'ils fonctionnent est sous-jacente au modèle : le diagnostic doit pouvoir identifier les contrôles qui sont intervenus dans une résolution, la prise de décision doit se faire en fonction des contrôles identifiés. La méthodologie adoptée permet un réel travail pluridisciplinaire dans les différents composants de cette architecture.

Cependant, nous devons travailler sur plusieurs questions d'ordre informatique qui permettront que le système devienne plus utilisable. En effet la construction des différents réseaux bayésiens est faite à partir des analyses didactiques produites et qui sont décrits sous forme de tableaux à plusieurs dimensions. Ensuite l'informaticien « code » ces connaissances dans les différents réseaux (réseau des connaissances, réseau pour le diagnostic et réseau pour la prise de décisions didactiques). Par ailleurs, le passage d'un réseau à un autre est également fait « à la main ». C'est-à-dire que nous dupliquons le réseau des connaissances et rajoutons les nœuds nécessaires pour le diagnostic ou pour la prise de décisions.

Nous envisageons entre autres de créer un éditeur de conceptions pour les didacticiens ; de proposer une automatisation du processus de production des règles diagnostic ; de proposer une automatisation du processus de production du réseau bayésien temporel et enfin de proposer une automatisation du processus de production du réseau bayésien décisionnel.

6. Bibliographie

- BAINBRIDGE L., QUINTANILLA, A.R. (Eds) (1989). *Developping Skilles with Information Technology*. Chichester. Wiley and Sons.
- BALACHEFF N. Conception, propriété du système sujet/milieu, Noirfalise R., Perrin-Glorian M.-J. (eds), *Actes de la VIIème école d'été de didactique des mathématiques*. Clermont-Ferrand : IREM de Clermont-Ferrand, p.215-229, 1995.
- CONATI C., GERTNER A.S., VAN LEHN K. Using Bayesian Networks to Manage Uncertainty in Student Modeling. *User Modeling and User-Adapted Interaction* 12, 2002, 371-417.
- ERAUT M., DU BOULAY B., Developing the attributes of medical professional judgement and competence, *Cognitive Sciences Research Paper* 518, University of Sussex, <http://www.cogs.susx.ac.uk/users/bend/doh.2000>.
- HINRICHHS, J.R. (1976). Personnel training. In M.D. Dunette (ed.). *Handbook of industrial and organizational psychology*, (p. 829-860). Chicago. Rand Mc Nally.
- LEPLAT J. L'activité psychologique de l'activité en ergonomie: aperçu sur son évolution, ses modèles et ses méthodes. Toulouse : Octarès, 2000
- LEPLAT, J. Préface. In In P. Pastré (ss dir.). *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse, Octarès Editions. 1-6.
- LIABEU C. Système de diagnostic pour l'apprentissage en chirurgie orthopédique. Rapport de stage du Master 2 R « Master 2 EIAH et Didactique. Juin 2006.
- LUENGO V., VADCARD L. Design of adaptive feedback in a web educational system 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education, Workshop on Adaptive Systems for Web-Based Education: Tools and Reusability, Netherlands, 2005
- LUENGO V., VADCARD L., DUBOIS M., MUFTI-ALCHAWAFA D. TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. Actes de la conférence « Ingénierie de Connaissances », Nantes, Juin 2006.
- MUFTI ALCHAWAFA D, LUENGO V., VADCARD L. Un modèle informatique pour la production de rétroactions épistémiques. L'exemple d'un environnement d'apprentissage en chirurgie, EIAH 2007, Lausanne, Juin 2007.
- MERLOZ P., TROCCAZ J., VADCARD L., TONETTI J. Techniques de chirurgie guidée par l'image appliquées aux vissages percutanés des fractures de l'anneau pelvien Fractures et disjonctions de l'anneau pelvien de l'adulte, Elsevier Masson SAS, 2006 : 112-121

- MINH CHIEU V., LUENGO V., VADCARD L., A Bayesian Network Based Approach for Student Diagnosis in Complex and Ill-structured Domains. In TICE 2006 « Information and Communication Technologies in Higher Education and Industry », octobre 2006.
- PASTRE, P.. Didactique professionnelle et développement. *Psychologie Française*, 42, 1, 89-100. 1997.
- PASTRE P. L'analyse du travail en didactique professionnelle *Revue Française de Pédagogie* 138, 2002, 9-17.
- PASTRE, P. Apprendre par la résolution de problèmes : le rôle de la simulation. In P. Pastré (ss dir.). *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse, Octarès Editions. 17-40. 2005.
- PATRICK, J. (1992). *Training, Research and practice*. London. Academic Press.
- PLOIX S., DESINDE M., MICHAU F., *Assessment and diagnosis for virtual reality training*, In : CALIE04, International Conference on Computer Aided Learning in Engineering education, Grenoble, 2004.
- ROUTT ML, SIMONIAN PT, AGNEW SG, MANN FA. Radiographic recognition of the sacral alar slope for optimal placement of iliosacral screws: a cadaveric and clinical study. *J Orthop Trauma* 1996, 3, 171-177.
- RABARDEL, P. *Les hommes et les technologies, une approche cognitive des instruments contemporains*. Paris. Armand Colin. 1995.
- SAMURÇAY R., ROGALSKI J. Exploitation didactique des situations de simulation, in *Le Travail Humain*, 1998, tome 61, n°4, pp.333-359.
- SAMURÇAY, R., RABARDEL, P. (2004). Modèles pour l'analyse de l'activité et des compétences : propositions. In R. Samurçay & P. Pastré (ss dir.). *recherches en didactique professionnelle*. Toulouse, Octarès Editions. 163-180.
- SEYMOUR, W.D. (1996). *Industrial training for manual operations*. London. Pitman.
- TONETTI J. Réalisation d'outils de réalité augmentée – Apprentissage, Simulation et Guidage de gestes en chirurgie du bassin. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 2003.
- ROUTT ML, SIMONIAN PT, AGNEW SG, MANN FA. Radiographic recognition of the sacral alar slope for optimal placement of iliosacral screws: a cadaveric and clinical study. *J Orthop Trauma* 1996, 3, 171-177.
- VADCARD L. A pedagogical strategy for the Virtual Orthopaedic European University. Final deliverable of the VOEU Project (IST-1999-13079) 2003. <http://vou-caos.vitamib.com/>
- VERGNAUD G., La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques* 10(2/3) 133/169. 1991.